



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Beton aus sandreichen Korngruppen

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. K. Kordina

Dr.-Ing. H. Ertingshausen

Juli 1986

Forschungsauftrag des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und Kunst im Rahmen der Förderung der wissenschaftlichen Forschung aus Mitteln des Zahlenlottos.



Beton aus sandreichen Korngruppen

Abschlußbericht

Prof. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. K. Kordina

Dr.-Ing. H. Ertingshausen

Juli 1986

Forschungsauftrag des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und Kunst im Rahmen der Förderung der wissenschaftlichen Forschung aus Mitteln des Zahlenlottos.

5/1/19 16
10



10.1.19

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1 Überblick	1
2 Kies- und Sand-Vorkommen in Niedersachsen	2
2.1 Erhebungen des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung	2
2.2 Feinstteilreiche Sande in Niedersachsen	3
3 Literatursichtung	5
3.1 Regelsieblinien und Kennwerte für Betonzuschlagstoffe	5
3.2 Verwendbarkeit von sandreichem Betonzuschlag	6
4 Versuchsprogramm	12
5 Ausgangsstoffe	13
5.1 Zement	13
5.2 Betonzuschlag	14
5.3 Fließmittel	16
6 Untersuchungen am Beton	16
6.1 Konzeption der Versuchsbetone	16
6.2 Betonherstellung und Frischbetonprüfungen	16
6.3 Prüfungen am Festbeton	19
6.3.1 Betondruckfestigkeit	19
6.3.2 Druck-Elastizitätsmodul	19
6.3.3 Wasserundurchlässigkeit	19
6.3.4 Schwindmessungen	19
6.3.5 Karbonatisierungstiefen	20
6.3.6 Frost-Tausalzwiderstand	20
6.3.7 Frostbeständigkeit	20
7 Auswertung der Versuche	21
7.1 Verarbeitbarkeit des Frischbetons	21
7.2 Betondruckfestigkeit	23
7.3 Elastizitätsmodul	23
7.4 Wassereindringtiefen	24
7.5 Schwinden des Festbetons	24
7.6 Karbonatisierung	24
7.7 Frost-Tausalzwiderstand	25
7.8 Frostbeständigkeit	27

8	Zusammenfassung	27
	Literaturverzeichnis	29
	Bilder 1 - 15	33

Anhang: (nur in der Originalfassung)

Beitrag des Niedersächsischen Landesverwaltungsamtes vom
23.09.1985: Die Kornzusammensetzung der Sande in nieder-
sächsischen Sand- und Kiessand-Lagerstätten.

1 Überblick

Kies und Sand gehören in der Bundesrepublik Deutschland zu den natürlichen Rohstoffen, die in den größten Mengen gefördert werden. Nach Schätzungen des Statistischen Bundesamtes und des Bundesverbandes der Kies- und Sandindustrie werden von der Bauwirtschaft jährlich für die Herstellung von Mörtel und Beton mehr als 200 Mio. Tonnen Sand und Kies verbraucht, allein in Niedersachsen rd. 40 Mio. Tonnen /1 - 4/.

Nach den bisher geltenden, auf langen Erfahrungen beruhenden Vorschriften werden für die Herstellung von Beton im allgemeinen 40 % Sand und 60 % Kies benötigt, während die natürlichen Vorkommen 60 % Sand und nur 40 % Kies enthalten. Sand (Korngruppe < 2 mm) wird infolgedessen vielfach ungenutzt zurückgespült oder abgelagert. Von Natur aus sind im norddeutschen Raum an Sandvorkommen noch ausreichende Reserven vorhanden (Bild 1, 2, 4), dagegen werden die Kiesvorräte (Bild 3) in vielen Landesteilen in einem Zeitraum von 10 bis 30 Jahren erschöpft oder nur noch unter erheblichen Schwierigkeiten zugänglich sein.

Es erschien deshalb als notwendig, Betone mit sandreichen Zuschlägen zu entwickeln, sie hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit, ihres Festigkeits- und Verformungsverhaltens zu untersuchen und ihre Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse (Wassereindringtiefe, Frostbeständigkeit, Karbonatisierung) zu prüfen.

2 Kies- und Sand-Vorkommen in Niedersachsen

2.1 Erhebungen des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung

Bereits 1979 konnten die Kiesvorräte nach intensiven Untersuchungsarbeiten des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (NLfB) grob abgeschätzt werden (5):

Tabelle 1

Gewinnungsgebiet	Vorrat		
Leinetal zwischen Hannover und Gronau	max.	90 Mio. t	
Brelinger Berge	ca.	12 " "	
Oberweser bei Hameln/Rinteln	210 - 280	" "	
Okertal oberhalb Wolfenbüttel	max	70 " "	
Innerstetal	max.	10 " "	
Leine-/Rhumetal bei Northeim	max.	70 " "	
Oder-/Siebertal	max.	20 " "	
Weser-/Werratal bei Hann.-Münden	ca.	7 " "	
Mittelweser zwischen Schlüsselburg und Nienburg	max.	200 " "	

Es muß davon ausgegangen werden, daß diese Kiesmengen nicht vollständig abgebaut werden können. Aus Gründen der Wasserwirtschaft, des Naturschutzes oder der Verkehrs- oder Bauplanung werden keine Abbaugenehmigungen erteilt oder die Grundstückseigentümer sind nicht bereit, die Lagerstätten zum Abbau freizugeben. Deshalb ist zu erwarten, daß für die Wirtschaftsräume Hannover und Braunschweig bereits ab 1990 und in den anderen Landesteilen spätestens zwei Jahrzehnte später ernste Versorgungsstörungen auftreten werden.

Das NLfB wurde zur Unterstützung dieses Forschungsvorhaben gebeten, alle dort vorliegenden Siebanalysen von Sand und Kiessanden auszuwerten, um festzustellen, in welchen Bereichen Niedersachsens Sande und Kiese vorkommen. Als Ergebnis sind die in Bild 1 - 4 wiedergegebenen Karten entstanden:

- Bild 1 Schwerpunkte der Verbreitung grobsandfreier, fein- bis mittelkörniger Sande,
- Bild 2 Gebiete, in denen sehr feinkörnige Sande dominieren oder häufiger auftreten,
- Bild 3 Gebiete mit Kies- und Kies-Sand-Lagerstätten,
- Bild 4 Gebiete, in denen gröberkörnige Sande dominieren oder häufiger auftreten.

(Der vollständige Bericht des NLfB ist als Beilage dem Original-Abschlußbericht angefügt bzw. kann gesondert beim Institut angefordert werden).

Ähnliche Untersuchungsergebnisse sind im Hinblick auf die Verwendung der nutzbaren Lockergesteine und Industriemineralien in Niedersachsen von Graupner in /6/ dargestellt.

2.2 Feinstteilreiche Sande in Niedersachsen

Von mehreren Förderbetrieben, die dem Güteschutzverband Kies-Sand Niedersachsen-Bremen e. V. angeschlossen sind, wurden Auskünfte über die Verwendung des sandreichen Materials eingeholt und die Siebanalysen der Sande 0 - 2 mm und 0 - 4 mm erbeten.

Die Umfrage ergab, daß die meisten Feinsande 0/2 z. Zt. im Straßenbau für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) eingesetzt /7/ oder von Mörtelwerken sowie Herstellern von Betonwaren abgenommen werden. Die Sande 0/4 werden jedoch auch in größerem Umfange für Betonwerke und Transportbetonwerke angeliefert. Bei Naßförderung werden die Feinstanteile fast immer in die Gruben zurückgespült, in einem Fall

werden die aus der Kieswäsche abgehenden Feinstanteile dem normalen ungewaschenen Sand für die Herstellung von HGT zugegeben. In einigen Fällen wurde das Feinmaterial für die Herstellung von Estrichsandern gesondert aufbereitet. Die Sieblinien zeigten sehr unterschiedliche Feinstanteilmengen < 0,125 bzw. enthielten darüber keine genaueren Angaben.

Tabelle 2

Sieblinien von verschiedenen Sanden aus Norddeutschland

Werk	Förderung naß = n trocken t	Maschenweiten (mm) - Siebdurchgänge in Masse % -							
		0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0
A	t	12,5	23,0	35,5	54	77	92	98	99
B	n	0,4	1,0	2,0	10	34	76	99	100
C	n	0	0,4	10,5	44	75	93	100	-
D	t	0,6	1	2	16,5	62	92	100	-
E	t	0,4	1	2	15	62	93	100	-
F	n	-	-	-	11	40	72	93	100
G	t	-	-	-	12	49	80	97	100
H	n	-	-	0,6	16	69	93	98	100
J	n	-	-	0,3	4,6	44	77	95	100
K	t	-	-	3,6	13,2	51	77	93	100
L	n	-	-	1	7	30	80	97	100
M	n	-	1	7	30	80	97	100	-
N	n	-	1	6	25	60	79	94	100
O	n	-	-	1	10	58	86	96	100
P	n	-	-	0,1	5,0	42	76	96	100
Q	n	-	0,3	0,8	7,6	39	75	84	100

Die o. a. Sieblinien zeigen deutlich, daß die Korngruppe 0,09 nur minimal vertreten ist und nur bei einer Trockengewinnung deutlich mit 23,0 M. % anfällt.

Im Vergleich zu diesen an den Gewinnungsstätten ermittelten Sieblinien der Sande sind die in Tabelle 4 wiedergegebenen Sieblinien der bei den im folgenden beschriebenen Versuche bewußt noch feinstsandreicher zusammengesetzt worden.

3 Literatursichtung

3.1 Regelsieblinien und Kennwerte für Betonzuschlagstoffe

Die Regelsieblinien nach DIN 1045 für die verschiedenen Größtkörner 8, 16, 32 und 64 mm sind als Linienzüge dargestellt und mit den Buchstaben A, B und C gekennzeichnet. Die zwischen den Linien B und C eingegrenzten Bereiche gelten hinsichtlich der Kornverteilung als günstig, zwischen den Linien A und B als brauchbar und oberhalb C als zu sandreich.

In der Betontechnologie werden verschiedene Kennwerte für die Kornverteilung der einzelnen Zuschlaggemische verwendet, um den Zementleimbedarf oder bei vorgegebenem Zementanteil den Wasserbedarf für eine bestimmte Konsistenz von Frischbeton zu ermitteln. Dabei werden bisher die Kornanteile bis 0,125 mm nicht berücksichtigt. Da in der DIN 1045 auch über den Siebdurchgang beim 0,5 mm-Sieb keine Angaben gemacht wurden, wird beim Vergleich der Kennwerte für die Regelsieblinien der Mittelwert der Siebdurchgänge durch das 0,25 mm und das 1,0 mm Sieb eingesetzt.

Als Sieblinienkennwerte werden der Feinheitsmodul F_m nach Abrams, der F-Wert nach Hummel, die Körnungsziffer k oder die Quersummenzahl (D-Summe) von den deutschsprachigen Betontechnologen verwendet. Aus [8] sind nachfolgend die Kennwerte für die Kornverteilung der C-Sieblinien wiedergegeben.

Tabelle 3

Kennwerte/Sieblinie	C 8	C 16	C 32
F_m -Wert (nach Abrams)	2,77	3,25	3,80
F-Wert (nach Hummel)	92	107	123
k -Wert	2,27	2,75	3,30
Quersummenzahl (D-Summe)	373	425	470

In der russischen Literatur werden Sande bis zur Korngröße 5 mm nach GOCT 4797-69 durch den Korngrößenmodul μ_{kp} klassifiziert als

grob	bei μ_{kp}	3,5 - 2,5
mittel	" "	2,5 - 2,0
fein	" "	2,0 - 1,5.

Dabei werden wie beim k-Wert die Rückstandsprozentage auf den Sieben nach GOCT 10266-80 mit den Öffnungen

0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5 mm
------	-------	------	------	-----	------

ermittelt und durch 100 dividiert /9/.

Die Sandfraktionen grob, mittel und fein können den Regelsieblinien nach DIN 1045 A 8, B 8 und C 8 zugeordnet werden wenn man für die sowjetischen Siebe die Schnittpunkte mit den o. a. Regelsieblinien bestimmt.

3.2 Verwendbarkeit von sandreichem Betonzuschlag

Erstmalig veröffentlichten 1971 Pilny und Eschke /10/ ihre Untersuchungen über sandreichen Beton. Da in Berlin die örtlichen Vorkommen nur verhältnismäßig feinkörnige Sande enthalten, müssen alle Zuschläge über 2 mm Korngröße mit großen Transportkosten herangeschafft werden. Mit 4 verschiedenen Sanden wurden sandreiche Betonmischungen zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit hergestellt, die den praktischen Anwendungsbereich bewußt in den "zu sandreichen" Bereich hinein weit überdeckten. Für die Versuche wurden Wasserzementwerte zwischen 0,5 bis 0,9 sowie die Konsistenzen K 2 und K 3 gewählt.

Betonverflüssiger oder Fließmittel sind damals nicht eingesetzt worden; die Konsistenz des Frischbetons wurde durch veränderte Zementleimzugabe beeinflusst. Folglich mußte ein größerer Sandanteil durch einen höheren Zementgehalt ausgeglichen werden.

Nach Auswertung von 40 verschiedenen Betonmischungen für jede Sandart gelang es, die bei den verschiedenen Sanden und Konsistenzen für eine bestimmte Betondruckfestigkeit erforderlichen Wasserzementwerte und Zementgehalte in Abhängigkeit von der Hummel'schen Feinheitsziffer des Zuschlagstoffes darzustellen. Untersuchungsergebnisse über andere Betoneigenschaften (Wassereindringtiefe, Elastizitätsmodul, Schwinden) wurden nicht bekannt.

In den nachfolgenden Jahren gewannen einerseits die Erkenntnisse über die Verknappung der Kies-Sand-Vorkommen an Bedeutung, andererseits lösten die in der Neufassung der DIN 1045 (1972) angegebenen Richtwerte für das Mehlkorn neue Überlegungen über die Verarbeitbarkeit und die Festbetoneigenschaften von Betonen mit höheren Anteilen der zum Mehlkorn zählenden mehlfeinen Stoffe im Zuschlag bis 0,25 mm Korngröße aus. Das Grenzkorn des Mehlkorngehaltes war von 0,2 mm auf 0,25 mm angehoben, aber der Richtwert für den Mehlkorngehalt beibehalten worden (z. B. für Straßenbeton nach TV 72 mit 400 kg/m³).

Teubert /11/ untersuchte viele natürliche Sande bis 4 mm Korngröße aus verschiedenen Vorkommen und bestimmte die Durchgänge durch die Siebe mit 0,2 mm bzw. 0,25 mm Maschenweite. Dabei fand er beim 0,25 mm-Sieb um 75 bis 314 Masse-% größere Siebdurchgänge als beim 0,2 mm-Sieb. Er verwies darauf, daß seit langen Jahren unter Verwendung solcher Sande in der Bundesrepublik Deutschland ein Großteil der Bauwerke folglich mit erhöhten Mehlkornanteilen hergestellt worden ist.

Auch Manns /12/ fand, daß nach der Umstellung auf ISO-Sieb-abmessungen und der Anhebung der Prüfkorngröße für das Mehl-korn von 0,2 auf 0,25 mm für die Praxis eine Verdoppelung des Mehlkornanteils eingetreten war. Hinsichtlich der Dau-erhaftigkeit wären keine Mängel beobachtet worden, so daß die Grenzen für den Mehlkorngehalt von Beton auf der Grund-lage der Korngrößengrenze von 0,25 mm in Frage zu stellen seien. Grübl /13/ fand, daß die Anhebung des Mehlkornan-teils auf bis 550 kg/m³ bei 0,25 mm Größtkorn nicht zur Ver-ringerung des Widerstandes gegen den Angriff von Frost und Taumitteln führt, dieser Widerstand aber von Kornanteil 0/0,125 mm abzuhängen scheint.

Im Hinblick auf die Rohstofflage der Bundesrepublik Deutsch-land empfahl Manns /12/ eine Überprüfung der betontechnolo-gischen Festlegungen, ob sie der Forderung nach optimaler Verwertung der geförderten Zuschlagstoffe ausreichend Rech-nung tragen. Immerhin können im Jahr etwa 25 Mio. Tonnen Feinsand bis 0,8 mm und etwa 15 Mio. Tonnen Sand bis 2 mm aus Fördergut nicht verwendet werden. An Betonen mit höhe-ren Mehlkorngehalten ($\leq 0,125$ mm : 358 - 502 kg/m³; $\leq 0,25$ mm : 423 - 599 kg/m³) konnten nicht nur gute Festig-keitsergebnisse und kleine Wassereindringtiefen erreicht werden, sondern befriedigende Schrumpfrißuntersuchungen durchgeführt werden; nur der Beton mit der feinsten Mehl-kornzusammensetzung (60 M % bis 0,04 mm) wies Risse auf. Der Einfluß des Mehlkornanteils auf den Frost-Taumit-tel-Widerstand an den Betonproben, die mit Luftporenbildnern und beim größten Mehlkornanteil zusätzlich mit Fließmitteln hergestellt waren, blieb nicht nennenswert. An Betonen mit höherem Sandanteil kann der höhere Wasseranspruch und damit der Einfluß des sandreichen Zuschlages auf die Verarbeitbar-keit und die Festigkeit durch einen höheren Zementgehalt und/oder durch Fließmittel weitgehend abgebaut werden. Un-ter Berücksichtigung der natürlichen Streuungen wurde emp-fohlen, die Anwendung sandreicher Betone mit einer neuen Fe-stigkeitsklasse B 20 zu fördern.

Rostásy und Ranisch /14/ untersuchten den Einfluß von Mehlkornart und -menge auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Die Mehlkornanteile bezogen sie jeweils aus 2 Flugaschen, Traß, Quarzmehl, Kalksteinmehl und 2 Natursande. Bei einem Nullbeton mit 399 kg/m³ Mehlkorn wurden bei den weiteren Versuchen ein Teil des Betonzuschlages durch die Betonzusatzstoffe bzw. die Natursande ersetzt und die Mehlkornanteile bis auf 719 kg/m³ erhöht. Die Zusatzstoffe übten proportional zur Dosierung eine ansteifende Wirkung aus, besonders je höher ihr Anteil < 0,125 mm war. Jedoch konnten alle Betone mit einem Mehlkorngehalt bis 600 kg/m³ mit den üblichen Rüttelgeräten verdichtet werden.

Die Sieblinie des Zuschlages blieb bei den Versuchen aber immer im günstigen Bereich zwischen B₃₂/A32 und erreichte nur bei 1 mm Korngröße die B₃₂-Linie. Für diesen Beton wurde ein Mehlkornanteil bis zu 600 kg/m³ als vertretbar angesehen. Die Einflüsse der Mehlkornanteile aus Natursand erwiesen sich nicht als nachteilig.

Mit den Feinststoffen im Beton befaßte sich Wesche /15/ bereits längere Zeit. Feinststoffe sind anorganisch-mineralische Stoffe mit einer maximalen Korngröße von 0,125 mm, die granulometrisch unter dem Begriff Mehlkorn zusammengefaßt werden. Als Zement sind sie immer, als Feinstzuschlag (Feinstsand, abschlämbare Bestandteile) fast immer im Beton vorhanden; als Zusatzstoffe (latenthdraulische Stoffe, Puzzolane, u. a.) werden sie dem Beton zugegeben. Sie können die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die Festbetoneigenschaften verbessern, Bindemittel ersetzen oder ergänzen. Bei chemischer Reaktivität eines Zusatzstoffes läßt sich versuchsmäßig der Anteil k ermitteln, der hinsichtlich der Druckfestigkeit dem Zement äquivalent ist. Im Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Wasserzementwert kann daraus ein verminderter w/z -Wert $w_f = w/(z + kf)$ abgeleitet werden. Wesche betrachtet den Beton als Zweistoffsystem, das aus einer Matrix- oder kontinuierlichen Phase und dem Zuschlag, der dispersiven Phase, besteht. Die Matrix ist

der Feinstmörtel, dem neben dem Zement die anderen Feinststoffe, also auch die Feinstzuschläge, zuzurechnen sind. Röbert /16/ hat bei seinen Untersuchungen über feinststoffhaltige und plastifizierte gefügedichte Zementbetone das Zweistoffsystem auf ein Fünfstoffsystem erweitert, das er als Matrix-Haufwerkskombination bezeichnet. Dabei verwendet er die beiden Begriffe Wasser-Mehlkorn-Verhältnis w_m und Zuschlag-Mehlkorn-Verhältnis μ . Durch Variation beider Mischungsverhältnisse w_m und μ kann ein Gemenge gefunden werden, das eine optimale Frischbetonverdichtung ermöglicht und bestimmte Konsistenzmaße erfüllt. - Beispielhaft wird auf weitere in der DDR durchgeführte Untersuchungen verwiesen. Über den Einfluß von Feinstzuschlagstoffen mit unterschiedlichem Reaktionsvermögen auf die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften berichtete Lisiecki /17/. Er fand, daß die Druckfestigkeit von Mörteln und Betonen, bei denen μ und w konstant bleiben, gesteigert werden kann, wenn der Anteil der Feinststoffe durch Zugabe von zementfeinen inerten Feinstzuschlagstoffen zuungunsten der groben Anteile erhöht wird. Dagegen empfiehlt Gressmann /18/ bei hochwertigem Beton für Verkehrsflächen, den Anteil an Korn von 0 bis 0,1 mm auf ein Minimum zu reduzieren, weil durch die feinsten Körnungen erwartungsgemäß der Wasser- bzw. Zementleimbedarf anwächst. Als Feinststoff wurde Hartgesteinsmehl bei den Untersuchungen verwendet.

Zur Verarbeitung sandreicher Betonzuschläge liegen u. a. auch aus Japan /19/ und Saudi-Arabien /20/ sowie sehr zahlreiche Veröffentlichungen aus der Sowjetunion vor, die jedoch nur teilweise ausgewertet werden konnten. In der Norm SN 488-76 /21/ werden die Anforderungen an feinkörnigen (Sand-) Beton beschrieben und Hinweise für die Wahl der Zusammensetzung, Herstellung, Verdichtung, Erhärtung (auch im Autoklaven) und die Gütekontrolle des Betons gegeben. Normaler feinkörniger Beton soll in der Regel in den Gebieten verwendet werden, in denen es keinen Grobzuschlag (Splitt, Kies) gibt. Mineralische Zusätze, Betonverflüssiger, Luftporenbildner und Erhärtungsbeschleuniger dürfen unter Beachtung bestimmter Stoffnormen verwendet werden.

Über die Anwendung von Sandbeton im Wohnungsbau berichten Baznov u. a. /22/. Es wird zwar auf großen Zementverbrauch, aber auch auf gute Verarbeitbarkeit, leichtes Einbringen in Schalungen und geringe Empfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen hingewiesen. In derselben Ausgabe der Zeitschrift berichten andere Verfasser über Fertigteile aus Feinkornbeton mit und ohne Dampfbehandlung, über Feinkornbeton mit Stahlfaserbewehrung für Fertigteile, Betonwaren und den Einsatz in erdbebenreichen Gebieten sowie über die Frostbeständigkeit von Feinkornbetonen im Straßenbau.

Michajlow u. a. /23/ geben einen Überblick über die Anwendung von Feinkornbeton im Bauwesen, wobei der Zuschlag auf Sand beschränkt bleibt. Die erreichbaren Druckfestigkeiten hängen von dem Korngrößenmodul μ_{kp} (s. Abschn. 2) ab, und werden für $\mu_{kp} \geq 2,1$ mit 40 N/mm² und für $\mu_{kp} = 0,8$ bis 2,0 mit 30 N/mm² angegeben. Die Neigung zur Rißbildung in Bauteilen aus Feinkornbeton wird als gering beurteilt. Der Zementbedarf ist um 15 - 30 % größer als bei Kies-Sand-Beton, kann aber durch Zusatzmittel oder -stoffe wiederum abgemindert werden. Im Vergleich zu Normalbeton ist bei Feinkornbeton die Verbundfestigkeit von Betonstahl um 30 % geringer. Die Verankerungslänge für vorgespannte Bauteile mit sofortigem Verbund ist für Feinkornbeton mit $\mu_{kp} = 0,8 - 2,0$ doppelt so groß wie für Feinkornbeton mit $\mu_{kp} \geq 2,1$. Die Prismendruckfestigkeit erreicht rd. 80 v. H. der Würfeldruckfestigkeit. (Guschtscha /24/ bestimmte den Prismenfestigkeitsbeiwert k durch statistische Auswertung von 310 Ergebnissen zu $k \geq 0,85$). Die zentrische Zugfestigkeit soll 10 % bzw. 8 % der Druckfestigkeit für Feinkornbeton mit $\mu_{kp} \geq 2,1$ bzw. $\mu_{kp} \leq 2,0$ betragen. Weiter sind Angaben über die Elastizitätsmoduln zu finden. Der Frostwiderstand von Feinkornbeton wird besser als der von Normalbeton eingestuft.

Untersuchungen über den Zementverbrauch bei Normalsand- ($\mu_{kp} = 2,43$) und Feinsandbeton ($\mu_{kp} = 1,04$) haben Malinina und Sckulimina /25/ durchgeführt. Sie fanden, daß bei

gleichbleibender Konsistenz im Vergleich zum Normalbeton für sandreichen Beton mit Mittelsand ($\mu_{kp} = 2,43$) 100 - 150 kg/m³ und mit Feinsand ($\mu_{kp} = 1,04$) 175 - 250 kg/m³ Zement mehr erforderlich sind; bei Einsatz von Betonverflüssigern wurden hierauf bezogen aber wieder bis zu 14 % Zement eingespart.

Krasnyi und Iwlew /25/ untersuchten Feinkornbeton bis 5 mm Korngröße und $\mu_{kp} = 1,3$ mit w/z-Werten von 0,35 bis 0,7, unterschiedlicher Konsistenz und verschiedenen Luftporengehalten auf ihre Frostbeständigkeit. Sie gelangten zu der Schlußfolgerung, daß der Frostwiderstand 165 Zyklen bei Temperaturen zwischen - 45 °C bis + 20 °C und 2000 Zyklen bei Temperaturen zwischen - 20 °C bis + 20 °C erreichen kann. Der Frostwiderstand ist umso größer, je kleiner W/Z wird und sinkt mit dem Zement/Sand-Verhältnis. Auch Iwanow u. a. /27/ haben Untersuchungen an frostbeständigen Betonen mit Feinsand und Kies bis 25 mm Korngröße durchgeführt, wobei verschiedene Zusatzmittel (LP und BV) eingesetzt wurden. Die Sande hatten Korngrößenmoduln μ_{kp} zwischen 0,93 und 1,89, der Kies erreichte $\mu_{kp} > 3,30$. Angestrebt wurde eine Betongüte von $> 30 \text{ N/mm}^2$. Die Zementgehalte betrugen mit hochwertigem Zement (Z 50) 325 bis 391 kg/m³ und konnten mit Zusatzmitteln auf 295 bis 355 kg/m³ gesenkt werden. Die w/z-Werte lagen zwischen 0,47 und 0,61. - Die Betonmischungen erreichten eine Frostbeständigkeit von 300 Zyklen.

4 Versuchsprogramm

In der DIN 1045 sind für Rezeptbetone B I und für Beton B II die Grenzsieblinien der Betonzuschläge vorgeschrieben und die Feinsandanteile zusammen mit den Mengen an Zement und Betonzusatzstoffen als Mehlkorn begrenzt worden.

Diese Einschränkungen gelten aber nicht für Betone, an die keine besonderen Anforderungen gestellt werden und die nach den üblichen Ergänzungsprüfungen den Nachweis hinreichender Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit erbringen können.

Als Teilaufgabe dieser Forschungsarbeit stellte das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung Erhebungen über die geographische Lage der Kies- und Sandvorkommen und über deren Kornverteilung an (Bild 1-4). Daraus ist zu erkennen (Bild 3), daß im Bereich der Flußtäler Weser, Leine und Oker nur noch Kiesvorräte für einen begrenzten Zeitraum vorhanden sind und sandreichere Vorkommen mit geeigneten Zuschlägen (Bild 4) für die Betonherstellung zunehmend genutzt werden müssen.

In dieser Forschungsarbeit wurden deshalb sandreiche Betonzuschläge untersucht, die aus natürlichen Lagerstätten stammen; nur bei wenigen Versuchen wurde Flugasche zugesetzt.

Unsere Untersuchungen hatten zum Ziel, die Verarbeitbarkeit des Frischbetons mit Zementgehalten zwischen 300 bis 400 kg m³ und Wasserzementwerten $w/z = 0,5$ bis $0,8$ zu prüfen und an dem Festbeton die Druckfestigkeit, die Wassereindringtiefe, den Elastizitätsmodul sowie das Schwinden, die Karbonatisierungstiefen sowie die Frostbeständigkeit zu ermitteln.

Die Vorversuche 1 bis 6 wurden in der Zeit zwischen November 1984 bis Januar 1985 durchgeführt. Die Hauptversuche 1 bis 23 folgten in der Zeit vom Februar 1985 bis Februar 1986.

5 Ausgangsstoffe

5.1 Zement

Portlandzemente PZ 35 F Teutonia

Die Zemente wurden sofort nach der Anlieferung im Labor des Instituts nach DIN 1164 geprüft. Die maßgeblichen Prismendruckfestigkeiten betrugen an den 28 Tage alten Proben (Mittelwerte) N/mm² 48,7; 47,3; 53,0; 45,3; 45,0; 46,6; 46,5; 47,5; 48,0; 54,8; 48,3.

5.2 Betonzuschlag

Grube Ofingen Korngruppen 0/1, 0/2,

Korngruppe 2/16 später getrennt 2/4, 4/8, 8/16

Grube Vienenburg Korngruppen 0/2, 2/8

Grube Abbesbüttel Korngruppe 0/1

Die einzelnen Korngruppen der verschiedenen Gewinnungsstätten wurden in Behältern getrennt gelagert und nach DIN 4226 ausgesiebt. Über die in den Grenzsieblinien nach DIN 1045 angegebenen Siebe hinaus wurden die Durchgänge bei den Sieben 0,125; 0,09 und (im Auswaschversuch) 0,063 mm ermittelt. Aus dem Sand 0/1 Abbesbüttel wurden zusätzlich die Bestandteile < 0,25 mm abgesiebt und die einzelnen Feinstanteilgruppen bestimmt.

Die Korngruppen 0/2; 0/1 und 0/0,25 wurden nach DIN 4226 auf Stoffe organischen Ursprungs und nach RGM in auf quellfähige Tonmineralien geprüft. Bei der Korngruppe 0/2 ergab der Natronlaugetest eine dunkelgelbe, bei der Korngruppe 0/1 eine hellgelbe Farbreaktion, während die Korngruppe 0/0,25 farblos reagierte.

Quellfähige Bestandteile nach DIN 4226 Teil 1 Abschnitt 7.6.3.3 konnten nicht in nennenswerten Mengen ermittelt werden (< 0,5 M. %).

In den Feinstsandanteilen konnten durch Röntgenfeinstrukturanalyse die Mineralien Quarz, Glimmer, Feldspat, Kaolinit und Montmorillonit nachgewiesen werden. Das quellfähige Montmorillonit war in den Korngruppen 0/0,25 und 0/1 nur in Spuren und in der Korngruppe 0/2 in sehr geringen, aber deutlich erkennbaren Mengen vorhanden.

Die Kornform der Sande ist subangular/angerundet zu beurteilen.

Für die Betonversuche wurden aus den einzelnen getrockneten Korngruppen 0-0,25; 0-1; 0-2; 2-8 mm Zuschlaggemische zusammengesetzt (Tabelle 4), die in den Sieblinien der Vor- und Hauptversuche graphisch dargestellt sind (Bilder 5 bis 7).

Für die Vorversuche und für die Hauptversuche wurden 5 Sieblinien mit dem Größtkorn 8 mm und in Ergänzung der Hauptversuche 3 Sieblinien mit dem Größtkorn 16 mm verwendet (Tabelle 4).

Tabelle 4

Sieblinien der verwendeten Zuschlagstoffe

		Durchgänge in Masse-%									
mm Nr.		0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Vorversuche	I	2	3	5	15	32	43	57	80	100	-
	II	1	1	2	11	51	65	69	72	100	-
	III	4	5	8	31	55	60	66	84	100	-
	IV	1	1	3	13	57	74	78	81	100	-
	V	4	6	9	32	62	73	82	92	100	-
Hauptversuche	I	3	4	5	18	38	51	65	84	100	-
	II	3	4	5	19	42	57	73	88	100	-
	III	5	6	10	42	56	64	74	88	100	-
	IV	5	7	11	46	61	67	74	88	100	-
	V	5	7	12	52	65	74	82	92	100	-
	VI	4	6	10	35	49	55	62	70	92	100
	VII	5	6	11	41	51	56	63	74	95	100
	VIII	5	7	12	45	59	65	71	79	95	100

5.3 Fließmittel

Sicotan BV 72

PA VII-1/211;

wässrige Lösung eines sulfonsäuremodifizierten Kondensationsproduktes aus Melamin und Formaldehyd.

6 Untersuchungen am Beton

6.1 Konzeption der Versuchsbetone

Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe wurde ausgehend von der Sieblinie C-8 nach DIN 1045 in mehreren Stufen zunehmend sandreicher gewählt (Tabelle 4 und Bilder 5-7). Derartige Sieblinien, gekennzeichnet durch den k-Wert (Tabelle 5), haben einen umso größeren Wasseranspruch, je feinkornreicher sie sind. Bei einem als wirtschaftlich vertretbar angenommenen Zementgehalt von 300 bis 400 kg/m³ Frischbeton wird der Wasser-Zementwert w/z zwangsläufig zwischen 0,5 bis 0,7 eingegrenzt; d. h. für einen Zementgehalt von 300 kg/m³ ergibt sich ein großer Wasserbedarf der notwendigen Zementleimmenge, für einen größeren Zementgehalt vermindert sich der Wasserbedarf und damit auch der w/z-Wert.

Da bei unseren Untersuchungen angestrebt wurde, einen möglichst dauerhaften Beton für den Hochbau zu untersuchen, wurde ein w/z-Wert $\leq 0,6$ angestrebt, aber auch bis w/z = 0,8 überschritten. Die Eignung sandreicher Betone für Verkehrsbauten muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben (Frost-Tausalz-Widerstand).

6.2 Betonherstellung und Frischbetonprüfungen

Die nach jeder Mischungsberechnung benötigten Bestandteile wurden getrennt gewogen und im Zyklus-Zwangsmischer Typ ZZ 150 SE (Mischtrommelinhalt 150 l) verarbeitet. Dabei wurden die Zuschlagstoffe und der Zement 1 Minute lang trockengemischt, anschließend das Wasser zugegeben und weitere 2 Minuten lang gemischt.

Aus dieser sogenannten Null-Mischung wurden unmittelbar anschließend für die Herstellung von 3 Probewürfeln von 15 cm Kantenlänge 5 lit. Beton entnommen und das Ausbreitmaß sowie das Verdichtungsmaß nach DIN 1048 von ein und demselben Laboranten ermittelt (Bilder 8 und 9, Tabelle 5). Nach Abschluß dieser Prüfungen wurde das Fließmittel (FM) der Betonmischung zugegeben und während weiteren 1 1/2 Minuten untergemischt. Danach wurden erneut das Ausbreitmaß und das Verdichtungsmaß bestimmt. Bis zu diesem Zeitpunkt waren seit der Zugabe des Anmachwassers 9 bis 11 Minuten vergangen. In einzelnen Fällen zeigten sich noch unzureichende Ausbreitmaße, so daß Fließmittel nachdosiert und erneut 1 Minute lang untergemischt wurde. Der Luftporengehalt wurde mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 1048 ermittelt; dabei betrug die Rüttelzeit 60 s auf einem Rütteltisch (6000 Schwingungen/min.) In einem 8 l-Drucktopf wurde zusätzlich die Frischbetonrohddichte bestimmt (Tabelle 5).

30 Minuten nach der FM-Zugabe wurde noch einmal das Ausbreitmaß bestimmt.

Die Temperaturen des Frischbetons wurden 15 Minuten nach der Wasserzugabe mit einem Tauchthermometer gemessen und lagen zwischen 17 °C und 20 °C. Nach Abschluß der Prüfungen am Frischbeton wurden die verschiedenen für die Festbetonprüfungen benötigten Formen gefüllt und 60 s lang auf dem Rütteltisch verdichtet.

Die Probekörper wurden nach 24 Stunden entschalt, lagerten bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach im Normklima 20 °C/65 % r. F.

Tabelle 5

Kennwerte des Frisch- und des Festbetons der Vor- und Hauptversuche

Vers.-Nr.	Sieb-linie	k-Wert	Z (kg/m³)	W/Z-Wert	W'/Z-Wert mit FM	Zuschlag K (kg/m³)	Anteil K _{0/0,125} (kg/m³)	W Z + 0/0,125	Frischbeton-rohdichte (kg/dm³)	A (cm)	V ohne FM	B _{w28} (N/mm²)	FM in MZ von Z	A mit FM (cm)	V -	Luftporen-gehalt in %	B _{w7} (N/mm²)	B _{w28} (N/mm²)	E-Modul · 10³ (N/mm²)
1	I	2,73	302	0,6	0,62	1836	86	0,466	2,320				2	34,0	1,15		27	43	
2			347	0,6	0,62	1760	82	0,485	2,315	34,5			2	55,3			25	40	
3	II	2,32	328	0,6	0,62	1667	37	0,540	2,170	32,6			2	38,2	1,15	4,0	23	36	
4	III	2,05	368	0,6	0,62	1661	139	0,436	2,250	31,5			2	41,0	1,10	6,0	29	45	
5	IV	1,96	328	0,7	0,72	1639	41	0,623	2,190				2	34,8	1,125	4,4	22	32	23,4
6	V	1,59	336	0,65	0,70	1657	144	0,458	2,230				5	37,8	1,15	4,8	25	39	22,6
1	I	2,44	360	0,6	0,61	1666	89	0,398	2,250	37,4	1,07	42	1	46,0	1,04	4,6	30	42	25,0
2			379	0,6	0,62	1706	91	0,483	2,320	33,1			2	45,5	1,04	2,0	29	42	24,5
3	II	2,21	303	0,7	0,74	1724	95	0,533	2,251		1,21	30	4	41,0	1,13	2,4	24	35	23,1
4			359	0,6	0,61	1666	91	0,478	2,245	37,3	1,10	33	1 + 3	46,0	1,03	4,8	26	36	22,9
5	III	1,76	351	0,7	0,71	1606	166	0,466	2,205	31,0	1,16	29	2	42,8	1,07	6,5	22	33	21,4
6			356	0,7	0,72	1574	162	0,483	2,230	38,65	1,1	33	1 + 3	46,3	1,03	4,5		34	23,3
7			372	0,6	0,62	1616	167	0,414	2,230	27,0	1,285	39	2	38,5	1,125	6,3	31	43	24,4
8	IV	1,63	297	0,7	0,72	1659	188	0,421	2,168	-	1,28	23	3	29,5	1,21	5,5	20	30	
9			300	0,8	0,83	1630	185	0,495	2,174	32,9			3	44,5	1,06	5,4	18	27	20,4
10			309+77*	0,7*	0,72*	1562	177	0,456**	2,190	33,5	1,195		2	42,8	1,05	4,9	22	34	22,7
11			320	0,7	0,74	1654	187	0,442	2,210	29,5	1,22	29	4	39,5	1,125	5,8	24	34	20,7
12			338+85*	0,6*	0,63*	1560	177	0,403**	2,210	25,5	1,285		3	41,8	1,09	6,0	28	43	23,1
13			346	0,7	0,74	1626	184	0,457	2,227	31,0	1,25	30	4	49,5	1,08	3,6	23	34	22,8
14			360	0,6	0,63	1615	183	0,398	2,200	-	1,32	33	3	34,0	1,19	6,0	26	41	23,1
15			361	0,7	-	1501	170	0,476	2,150	42,0	1,15	32	0	-	-	6,2	-	-	20,5
16			374	0,6	0,63	1626	184	0,403	2,225	-	1,30	36	3	36,0	1,19	6,0	25	40	23,6
17			375	0,55	0,59	1618	183	0,371	2,215	-	1,34	-	4	35,3	1,16	6,7	36	50	24,5
18			398	0,5	0,54	1636	185	0,341	2,250	-	1,33	18	4	34,2	1,18	5,8	41	54	26,0
19	V	1,34	357	0,7	0,73	1533	190	0,457	2,150	31,0	1,215	42	3	45,0	1,05	6,8	22	34	18,9
20	VI	2,36	270+120	0,65*	0,65*	1559	153	0,434**	2,220	-	1,34		5	37,5	1,15	4,9	22	38	20,6
21	VII	2,19	340	0,6	0,63	1595	175	0,396	2,208				3	37,0	1,17		keine Prüfungen		
22	VIII	1,85	330	0,7	0,74	1663	197	0,438	2,241	29,5	-	32	4	46,7	1,08	4,2	22	35	20,7
23			338	0,6	0,65	1645	195	0,381	2,192				5	32,5	1,175	5,2	27,5	41	23,2

W - Wasseranteil

* Anteil Steinkohlenflugasche

A = Ausbreitmaß

B_w = Betondruckfestigkeit

* w/(Z + 0,3f)

v = Verdichtungsmaß

* W'/Z + 0,3 f

FM = Fließmittelanteil

**w/(Z+0,3f+0/0,125)

W' = W + Fließmittel-
anteil

6.3 Prüfungen am Festbeton

6.3.1 Betondruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit des Nullbetons und des Betons mit Fließmitteln (FM) wurde jeweils an 3 Probewürfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von 7 und 28 Tagen (Nullbeton nur nach 28 Tagen) nach DIN 1048 geprüft (Ergebnisse s. Tabelle 5 und Bilder 10, 10a, 10b).

6.3.2 Druck-Elastizitätsmodul (E-Modul)

Der E-Modul der Betone mit Fließmitteln wurde an Zylindern mit 15 cm Durchmesser und 35 cm Höhe im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 geprüft (Ergebnisse Tabelle 5 und Bilder 11 und 12).

6.3.3 Wasserundurchlässigkeit

An Platten aus FM-Beton mit den Abmessungen 20 x 20 x 12 cm³ wurde die Wassereindringtiefe nach DIN 1048 im Probenalter von 28 Tagen geprüft (Ergebnisse Bild 14).

6.3.4 Schwindmessungen

An dem FM-Beton wurden die Schwindverkürzungen auf den 4 Seiten von jeweils 2 Prismen mit den Abmessungen 15 x 15 x 70 cm³ im Alter von 7 bis 21 Tagen 2x täglich, danach werktäglich 1x gemessen. Dabei wurde ein Setzdehnungsmesser mit 500 mm Meßlänge von ein und demselben Laboranten verwendet. Die Schwindmessungen wurden nach 370 Tagen abgebrochen. Die Ergebnisse sind in Bild 13 graphisch dargestellt.

6.3.5 Karbonatisierungstiefen

An einem weiteren Prisma ($15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$) aus FM-Beton wurde im Alter von 180 bis 300 Tagen erstmals die Karbonatisierungstiefe gemessen. Dazu wurde eine Scheibe von rd. 10 cm Dicke von dem Prisma abgespalten und die Bruchfläche mit einer Phenolphthaleinlösung besprüht. Die Karbonatisierungstiefe wurde nach Planimetrierung der indizierten Fläche rechnerisch gemittelt und die Größtwerte protokolliert.

Die Probekörper wurden nach der 1. Messung in eine Klimakammer mit Normklima 20/65 gebracht und mit CO_2 begast (die Konzentration betrug 1,5 Masse-% CO_2). Jeweils nach 2 Wochen bis zur 10wöchigen Lagerung unter CO_2 -Gas wurden wiederum Betonscheiben von den Prismen abgespaltet und die Karbonatisierungstiefen wie beschrieben ermittelt (Ergebnisse s. Tabelle 7).

6.3.6 Frost-Tausalzwiderstand

Die mit 120 l begrenzte Frischbetonmenge ließ es nicht zu, bei den Vor- bzw. Hauptversuchen noch Probekörper für die o. g. Prüfungen herzustellen. Deshalb wurden im Anschluß an die Hauptversuche noch Probekörper aus 2 Mischungen (Hauptversuche 11 und 18) hergestellt, um den Frost-Tausalzwiderstand nach Ø-Norm B 3306 und Tausalzergänzungen (März 1976) zu prüfen.

6.3.7 Frostbeständigkeit

Nach Abschluß der CO_2 -Lagerung wurde von den zur Ermittlung der Karbonatisierungstiefen verwendeten Betonprismen jeweils ein Endstück abgesägt, so daß ein Würfel von 15 cm Kantenlänge entstand. Diese Würfel wurden 25 Frost-Tauwechseln (FTW) nach DIN 52 252 ausgesetzt. Nach 15, 20 und 25 FTW wurden die Proben auf Risse und Beschädigungen untersucht.

7 Auswertung der Versuche

7.1 Verarbeitbarkeit des Frischbetons

Die Sieblinien der Zuschlagstoffe wurden nach den Vorversuchen bewußt so gewählt, daß sie oberhalb der C-Linie (nach DIN 1045) verliefen. Erwartungsgemäß ergaben sich trotz hoher Zementgehalte und w/z-Werte zwischen 0,5 und 0,8 zu geringe Zementleimmengen, um die feinsandreichen Mischungen hinreichend verarbeitungswillig zu machen (Ausnahme Hauptversuch 15). Deshalb wurden 1 bis 6 Masseprozent Fließmittel - bezogen auf den Zementanteil - zugesetzt, um ein hinreichendes Ausbreitmaß zu erreichen. In Bild 8 und 9 sind die am Normalbeton und dem Beton mit Fließmitteln erzielten Konsistenzmaße - Ausbreitmaß und Verdichtungsmaß - über dem Faktor $w/(z + \alpha f + k (0-0,125))$ aufgetragen, der in /16/ für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit vorgeschlagen worden ist. Im Nenner des Faktors sind der Zementanteil, der mit dem wirksamen Faktor α reduzierte Anteil von Betonzusatzstoffen (hier $\alpha = 0,3$ für Flugasche) und der Feinsandanteil 0-0,125 nun in Masseanteilen addiert. Sie können als wirksames Mehlkorn bezeichnet werden (Tabelle 6).

Ausbreitmaße und Verdichtungsmaße verhalten sich gegenläufig. Das Ausbreitmaß steigt mit zunehmendem Wasser/wirksamen Mehlkorn-Verhältnis an, das Verdichtungsmaß nimmt entsprechend ab.

Die beiden Grafiken zeigen deutlich die erhebliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Betone nach der Zugabe des Fließmittels. Damit gelang es, die Ausbreitmaße um bis zu 18 cm, im Mittel um etwa 10 cm zu erhöhen und die Verdichtungsmaße um 0,1 bis 0,05 zu vermindern.

Tabelle 6

Mehlkornanteile

	Vers. - Nr.	Z [kg/m³]	0/0,125 [kg/m³]	Z+0/0,125 [kg/m³]	0/0,25 [kg/m³]	Z+0/0,25 [kg/m³]
Vorversuche	1	302	86	388	281	583
	2	347	82	429	269	616
	3	328	37	365	190	518
	4	368	139	507	511	879
	5	328	41	369	211	539
	6	336	144	480	531	867
Hauptversuche	1	360	89	449	301	661
	2	379	91	470	308	687
	3	303	95	398	323	626
	4	359	91	450	312	671
	5	351	166	517	676	1027
	6	356	162	518	662	1018
	7	372	167	539	680	1052
	8	297	188	485	768	1065
	9	300	185	485	755	1055
	10	309+77 *	177	563	723	1109
	11	320	187	507	766	1086
	12	338+85 *	177	600	722	1145
	13	346	184	530	530	1099
	14	360	183	543	748	1108
	15	361	170	531	695	1056
	16	374	184	558	753	1127
	17	375	183	558	749	1124
18	398	185	583	758	1156	
19	357	190	547	796	1153	
20	270+120 *	153	543	562	952	
21	340	175	515	675	1015	
22	330	197	527	730	1060	
23	338	195	533	744	1082	

* Anteil am 0,125 mm-Mehlfluasche

7.2 Betondruckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten des 28 Tage alten Betons mit Fließmittel sind in Bild 10 über dem w/z-Wert aufgetragen. Sie nehmen erwartungsgemäß mit fallendem w/z-Wert deutlich ab. Die in Bild 10a gewählte Darstellung der Betondruckfestigkeiten über dem mit dem Faktor $300/z$ multiplizierten w/z-Wert zeigt einen flacheren Kurvenverlauf, weil die Abszissenwerte mit zunehmendem Zementanteil kleiner werden. In Bild 10b sind die Betondruckfestigkeiten über dem Faktor Wasser/wirksamen Mehlkornanteil ($z + \alpha f + 0/0,125$) aufgetragen (vergl. Darstellung der Verarbeitbarkeit in den Bildern 8 und 9). Dabei ergibt sich aber nicht die straffe Korrelation wie in den Bildern 10 bzw. 10a.

Es kann jedoch festgestellt werden, daß es mit Zugabe von Fließmitteln gelingt, aus sandreichen Zuschlagstoffen und mit Zementgehalten von 300 bis 400 kg/m³ einen Beton herzustellen, der den Anforderungen der Güteklasse B 25 genügt.

7.3 Elastizitätsmodul

Die Ergebnisse der Prüfungen der Elastizitätsmoduln sind in Bild 11 über den Druckfestigkeiten der zugehörigen 28 Tage alten Betonprobewürfel aufgetragen. Wie erwartet, stellten sich große Streuungen in den Ergebnissen ein. Die Werte liegen im unteren Bereich der Prüfergebnisse, die in den letzten Jahren an Normalbeton im Institut ermittelt worden sind (Bild 12). Die E-Moduli der sandreichen Betone sind dort als Dreiecke eingetragen. Sie liegen - mit einer Ausnahme - im unteren Streubereich der nach DIN 1045 anzunehmenden Werte.

7.4 Wassereindringtiefen

Die in DIN 1045 geforderte Wasserundurchlässigkeit, die bei Wassereindringtiefen von i. M. 5 cm erfüllt wird, haben alle Probeplatten erreicht. Die bei den Prüfungen nach DIN 1048 gefundenen Mittelwerte der Wassereindringtiefen liegen zwischen 0,8 und 2,8 cm (Bild 14). Eine Abhängigkeit der einzelnen Prüfergebnisse von dem Sandanteil $< 0,125$ mm bzw. vom Mehlkornanteil war nicht zu erkennen.

7.5 Schwinden des Festbetons

Die Schwindverkürzungen wurden für 15 Betonsorten an jeweils 2 Prismen $15 \times 15 \times 70$ cm³ in einem Zeitraum von 250 bis 360 Tagen gemessen. Aus den an je 4 Seiten gemessenen Werten wurde ein Mittelwert für beide Prismen ermittelt. In Bild 13 sind in Abhängigkeit vom Sandanteil 0/0,125 mm mehrere Schwindkurven graphisch dargestellt. Daran ist deutlich zu erkennen, daß die Schwindverkürzungen umso größer wurden, je mehr Feinsand 0/0,125 im Beton enthalten ist. Die kleinste Schwindverkürzung betrug 0,75 mm/m, die größte 1,2 mm/m, als die Messungen beendet wurden.

7.6 Karbonatisierung

Die ersten Karbonatisierungstiefen wurden an 10 Betonproben ermittelt, die 6 bis 10 Monate lang im Normalklima 20/65 aufbewahrt waren. Zur Beschleunigung der "Alterung" wurden sie danach in einer Klimakammer 10 Wochen lang mit CO₂ begast. Die unter dieser Beanspruchung fortschreitende Karbonatisierung wurde in Abständen von 2 Wochen überprüft. In Bild 15 sind die planimetrisch ermittelten Karbonatisierungstiefen t_m aufgetragen und zwar für die normal-klimatisierten Proben und für die gleichen Proben nach 6- bzw. 10wöchiger Lagerung unter CO₂. In Tabelle 7 sind die mittleren Karbonatisierungstiefen t_m und die größten gemessenen Werte t_{max} zusammengestellt, die nach der Lagerung im Klima 20/65 und nach 10wöchiger Lagerung unter CO₂ ermittelt wor-

den sind. Auch wenn die Zahl der Proben gering ist, wird es deutlich, daß die sandreicheren Anteile der Zuschlagstoffe keinen signifikanten Einfluß auf die Zunahme der Karbonatisierungstiefe haben. Wie bekannt, wirkt sich der w/z-Wert günstig auf den Karbonatisierungswiderstand aus, denn je geringer der w/z-Wert des Betons ist, umso geringer ist der Karbonatisierungsfortschritt, auch während der als Zeitraffung durchgeführten CO₂-Lagerung.

7.7 Frost-Tausalzwiderstand

Für 2 zusätzliche Tastversuche wurden mit den Mischrezepten der Hauptversuche 11 und 18 ohne zusätzliche LP-Mittel-Zugabe gesonderte Prüfkörper hergestellt. Diese Betone unterschieden sich bei gleichbleibendem Feinsandanteil 0/0,125 von 187 kg/m³ durch die Zementgehalte, die w/z-Werte und die Druckfestigkeiten:

HV 11	$z = 320 \text{ kg/m}^3$	$w/z = 0,7$	$\beta_{W28} = 34 \text{ N/mm}^2$
HV 18	$z = 398 \text{ kg/m}^3$	$w/z = 0,5$	$\beta_{W28} = 54 \text{ N/mm}^2$

Die beiden Betone zeigten sich im Laufe der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach Ö-Norm große Abwitterungen des Feinmörtels, die nach 25 FTW zur Einstellung der Prüfungen führten; allerdings war bei dem weniger druckfesten Beton nach HV 11 die Masse der abgewitterten Bestandteile 3,2mal größer als bei dem druckfesteren Beton nach HV 18.

Da nach /13/ der Mehlkornanteil eines Betons in bestimmten Grenzen bei Zugabe von LP-Mitteln keinen großen Einfluß auf den Frost-Tausalz-Widerstand haben soll, empfiehlt es sich, bei einem Fortsetzungsauftrag dieses Problem an Beton mit natürlichen Feinsanden näher zu untersuchen.

Tabelle 7

Karbonatisierungstiefen

Haupt- versuch Nr.	W/Z	Sand 0/0,125 [kg/m³]	Alter Tage	Größt- Wert [mm]	Mittel- Wert [mm]
3	0,7	95	191	6	3,8
			261	25	15,3
5	0,7	166	294	10	4,9
			364	21	18,4
6	0,7	162	245	7	4,7
			315	21	16,1
7	0,6	167	261	6	3,4
			331	17	11,9
9	0,8	185	185	7	4,6
			255	28	21,4
10	0,7	177	164	8	4,9
			234	22	16,4
11	0,7	187	212	8	3,9
			282	24	17,5
12	0,6	177	172	5	2,2
			242	16	12,2
14	0,6	183	275	7	3,3
			345	18	14,5
19	0,7	190	179	4	2,1
			249	23	14,9

7.8 Frostbeständigkeit

Von den bereits für Karbonatisierungsprüfungen verwendeten Betonprismen wurden aus dem Endstück Betonwürfel mit 15 cm Kantenlänge abgesägt und 25 Frost-Tau-Wechseln (FTW) ausgesetzt. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 52 252. Dabei waren die Betone 250 bis 370 Tage alt.

An den Proben der Hauptversuche (HV) 6 und 11 war bei allen Kontrollen festzustellen, daß die abgeriebenen freien Oberflächen der Prismen absandeten. Das gleiche zeigte sich an der Probe des HV 9 an einer beim Transport des Prismas angeschlagenen Ecke des Würfels.

An den Proben der HV 3, 5 und 14 zeigten sich im Laufe der FTW keine Veränderungen, bei den übrigen Proben wurden feine, krakeleeeartige Risse an den Schalungsflächen beobachtet, die nach Abschluß der Prüfung (25 FTW) an den trockenen Probekörpern lediglich bei den HV 10, 12 und 19 noch zu beobachten waren.

8 Zusammenfassung

Im Hinblick auf die zu erwartende Verknappung der natürlichen Kies-Sand-Mengen in Niedersachsen und anderen Teilen Deutschlands wurden betontechnologische Überlegungen angestellt, um auch sandreichere Betone wirtschaftlich herstellen und einsetzen zu können. Nach den hier ermittelten Ergebnissen ist es möglich, die Verarbeitbarkeit von Betonen mit hohem Feinkornanteil mit Hilfe von Fließmitteln brauchbar zu verbessern. Die Zementanteile können unter 400 kg/m^3 , die Wasserzementwerte sollten zwischen 0,5 und 0,7 eingestellt werden. Solche Betone erhalten im Alter von 28 Tagen Druckfestigkeiten, die den Anforderungen der Güteklasse B 25 genügen, sowie Elastizitätsmoduli, die im unteren zulässigen Streubereich nach DIN 1045 liegen und sich kaum von Normalbetonen mit Zuschlägen aus den hiesigen natürlichen Lagerstätten unterscheiden.

Die sandreichen Betone schwinden mehr als Betone mit Zuschlägen, die innerhalb der Grenzsieblinien der DIN 1045 zu finden sind. Es konnte festgestellt werden, daß weder der Zementgehalt noch der w/z-Wert, sondern die Menge der Feinsandanteile 0/0,125 die Schwindverkürzungen unmittelbar beeinflusst.

Bei den durch CO₂-Lagerung beschleunigten Karbonatisierungsversuchen hat sich gezeigt, daß sich nicht die Feinsandanteile, sondern die höheren w/z-Werte nachteilig auf die hinsichtlich der Karbonatisierung zu beurteilende Dauerhaftigkeit des Betons auswirken.

Die Untersuchungen der Frost-Tausalz-Beständigkeit, die nur an 2 Betonen durchgeführt wurden, erlauben noch keine eindeutigen Aussagen. Dagegen kann sandreicher Beton hinsichtlich seiner Frostbeständigkeit mit großer Wahrscheinlichkeit als unbedenklich eingestuft werden.

Die Versuchsbetone enthielten z. T. erheblich größere Mehlkornanteile als nach DIN 1045 (Entwurf Juli 1986) für Rezeptbetone B I und B II zugelassen werden soll. Es ist aber möglich, durch entsprechende Eignungsprüfungen nachzuweisen, daß Beton mit sandreichen Zuschlagstoffen befriedigend verarbeitbar und hinreichend druckfest hergestellt werden kann, sofern keine besonderen Anforderungen die strikte Einhaltung der in DIN 1045 aufgestellten Regeln für den Mehlkorngehalt und die Grenzsieblinien gebieten.

Nachdem inzwischen Feinsand auch für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) verwendet werden darf (26), werden auch für die Herstellung von Normalbeton mit hohen Feinsandanteilen in den Transportbetonwerken und bei den Kies-Sand-Lieferanten in zunehmendem Maße ernsthafte Überlegungen anzustellen sein.

Eine wünschenswerte Aufklärung der Verbraucher sollte zum Ziel haben, daß nicht für jedes Bauwerk überhöhte Anforderungen an die Betonzusammensetzung gestellt werden müssen, die nur mit hochwertigem Beton und deshalb nur mit erhöhtem Material- und Kostenaufwand zu erfüllen sind.

Ausgehend von den an sandreichen Betonen hier gefundenen Versuchsergebnissen empfiehlt es sich, die Untersuchungen fortzusetzen. Dabei sollten das Schwindverhalten in Abhängigkeit von den Feinanteilen, seine Abminderung durch Auswahl verschiedener Zemente oder Betonzusatzmittel bzw. durch Reduktion des w/z-Wertes, die Frost-Tausalz-Beständigkeit und das Kriechen unter Dauerbelastung untersucht werden. Die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse schließen sandreiche Betone von der Verwendung für hochbeanspruchte Außenbauteile aus.

Literatur

- / 1/ Stein, V.: Betonzuschläge-Entwicklungstendenzen der Versorgung in der Bundesrepublik Deutschland - Beton-Informationen 1983, H. 2
Rohstoffsicherung - Aspekte für den Betonbau. Beton 1985, H. 1
- / 2/ Bundesverbund der Deutschen Kies- und Sandindustrie e. V., Geschäftsbericht 1983/84
- / 3/ Verband Deutscher Betoningenieure: Verfügbarkeit von Zuschlägen - VDB-Information 1979, Nr. 15
- / 4/ Bundesministerium für Wirtschaft: Einheimische Rohstoffe - Steine, Erden und Industriematerialien - 3. Auflage Dezember 1979

- / 5/ Stein, V.: Die zukünftige Versorgung Niedersachsens mit Betonzuschlagstoffen. Vortrag am 31.05.79 vor der "Güteüberwachung Kies und Sand Niedersachsen-Bremen e. V." (unveröffentlicht)

- / 6/ Graupner, A.: Die Lagerstätten Niedersachsens und ihre Bewirtschaftung. 2. Abteilung Steine und Erden. - Gebr. Wurm KG, Göttingen 1970

- / 7/ Schmidt, M.: Hydraulisch gebundene Tragschichten nach ZTVT und RStO - Straße und Autobahn 1985, Heft 11

- / 8/ Weber, J. H.; Wesche, K.: Kennwerte für die Kornverteilung und den Wasseranspruch von Zuschlaggemischen - Betonsteinzeitung 1971, H. 9

- / 9/ GOCT 4797-69: Sand bis Korngröße 5 mm - (Mitteilung des Instituts für Stahlbeton Dresden)

- /10/ Eschke, K. R.; Pilny, F.: Sandreicher Beton - Beton- und Stahlbetonbau 1971, H. 12

- /11/ Teubert, J.: Zur Festlegung von Mehlkorngrenzen für Beton - Beton- und Stahlbetonbau 1980, H. 4

- /12/ Manns, W.: Betontechnologische Überlegungen zur Ausnutzbarkeit natürlicher Zuschlagvorkommen - Beton 1982, H. 11
Zementmengenminimierung und Mindestzementmenge bei Zuschlag mit hohem Feinanteil - Betontechnik 1985, H. 6

- /13/ Grübl, P.: Einfluß der Feinstanteile des Sandes auf die Frost-Tausalzbeständigkeit von Beton - Forschungsbericht Sept. 1980 d. Lehrst. für Baustoffkunde, TU München

- /14/ Rostásy, F. S.; Ranisch, E.-H.: Einfluß des Mehlkorns auf die Betoneigenschaften - beton 1984, H. 1
- /15/ Wesche, K.; Schubert, P.: Feinstoffe im Beton - Einfluß auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons - Betontechnik 1985, H. 3
- /16/ Röbert, S.: Projektierung feinststoffhaltiger und plastifizierter Zementbetone - Betontechnik 1985, H. 2
- /17/ Lisiecki, K.-H.: Einfluß von Feinstzuschlagstoffen mit unterschiedlichem Rekationsvermögen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften - Betontechnik 1985, H. 4
- /18/ Gressmann, D.: Untersuchungen zur Wirkung von inertem Feinkorn auf die Eigenschaften von hochwertigem Beton für Verkehrsflächen - Die Straße 1983, H. 7
- /19/ Kagaya, M.; Tokuda, H.; Kawakami, M.: Method of Measuring Sand Particle Character and its Application to Proportioning Concrete - ACI-Journal, May/June 1983
- /20/ Taryal, M. S.; Chowdury, M. K.: Effect of superfine Sand on workability and compressive Strength of Cement Mortar and Concrete - Intern. Journal of Housing Science, Vol. 7, No. 2 (1983)
- /21/ SN 488-76: Herstellungsvorschriften für feinkörnigen Sandbeton - Übersetzung durch Institut für Stahlbeton Dresden
- /22/ Baznow, J. M.: Der Versuch der Anwendung des Sandbetons im Wohnungsbau - Beton i zelezobeton 1973, H. 5

- /23/ Michajlow; Krasnyi; Demjanuk: Anwendung der Feinkornbetone im Bauwesen - beton i zelezobeton 1980, H. 2

- /24/ Gutschtscha; Laritschewa: Prismenfestigkeitskoeffizienten von normalen Schwerbetonen und feinkörnigen Betonen - beton i zelezobeton 1984, H. 8

- /25/ Malinina, L. A.; Sckulimina, W. F.: Über den Zementverbrauch für Feinkornbeton mit Feinsanden - beton i zelezobeton 1980, H. 8

- /26/ Krasnyi; Iwlew: Frostwiderstand von Feinkornbeton - beton i zelezobeton 1983, H. 1

- /27/ Iwanow; Jambuch; Milenina: Frostbeständige Betone unter Anwendung von Feinsanden mit chemischen Zusatzmitteln - beton i zelezobeton 1985, H. 4

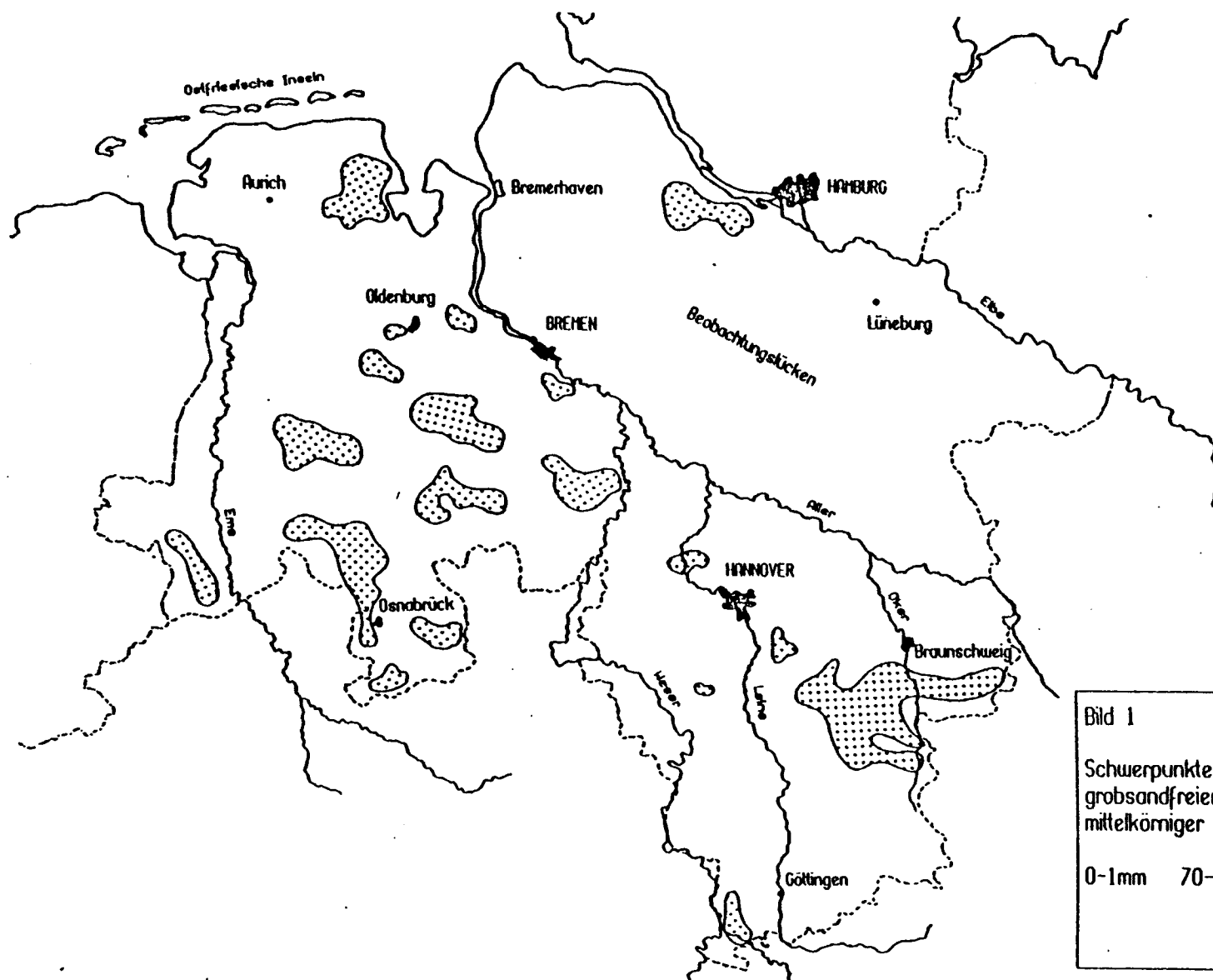


Bild 1

Schwerpunkte der Verbreitung
grobsandfreier, fein- bis
mittelkörniger Sande.

0-1mm 70-90 MZ

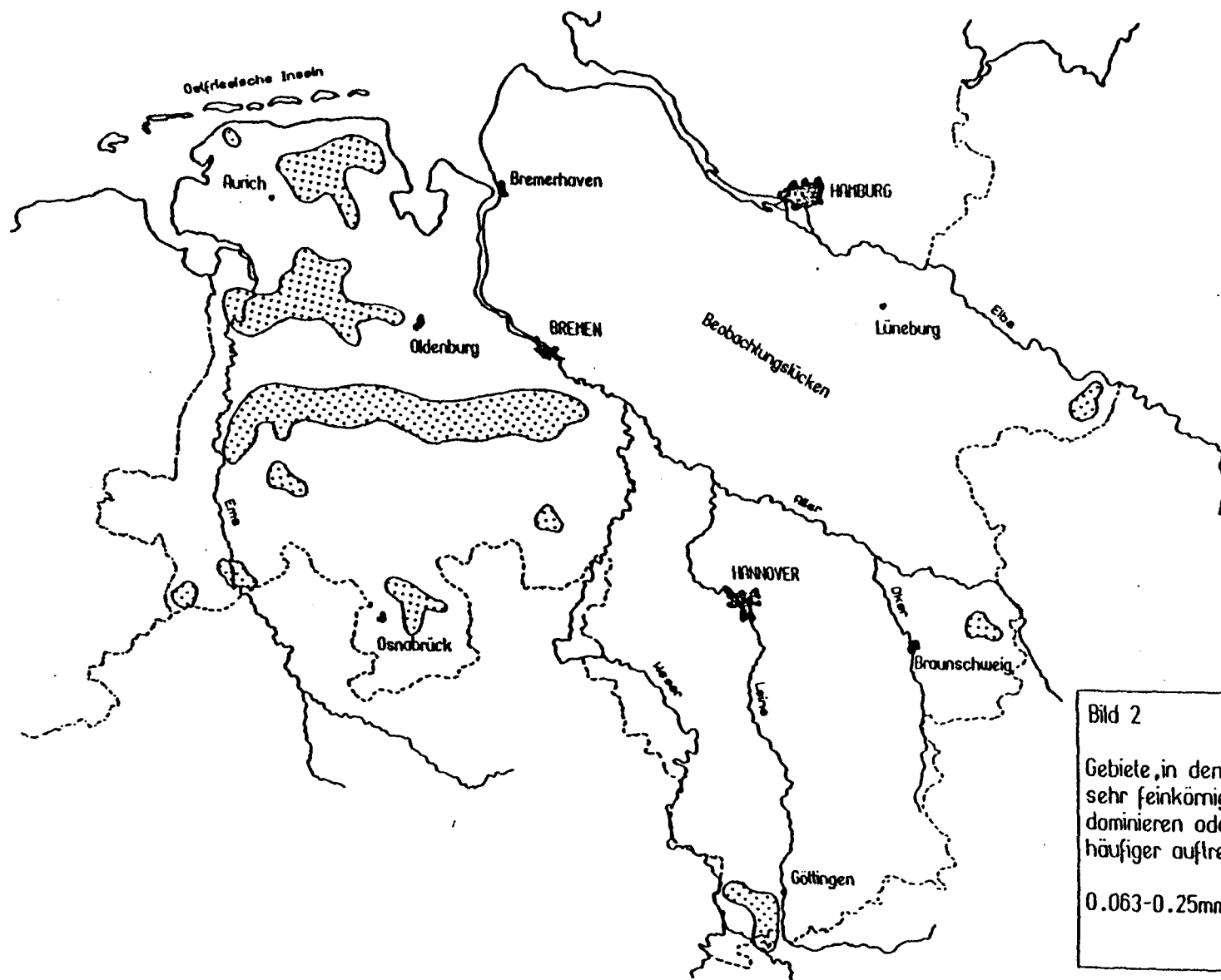


Bild 2

Gebiete, in denen
sehr feinkörnige Sande
dominieren oder
häufiger auftreten.

0.063-0.25mm > 75 MZ

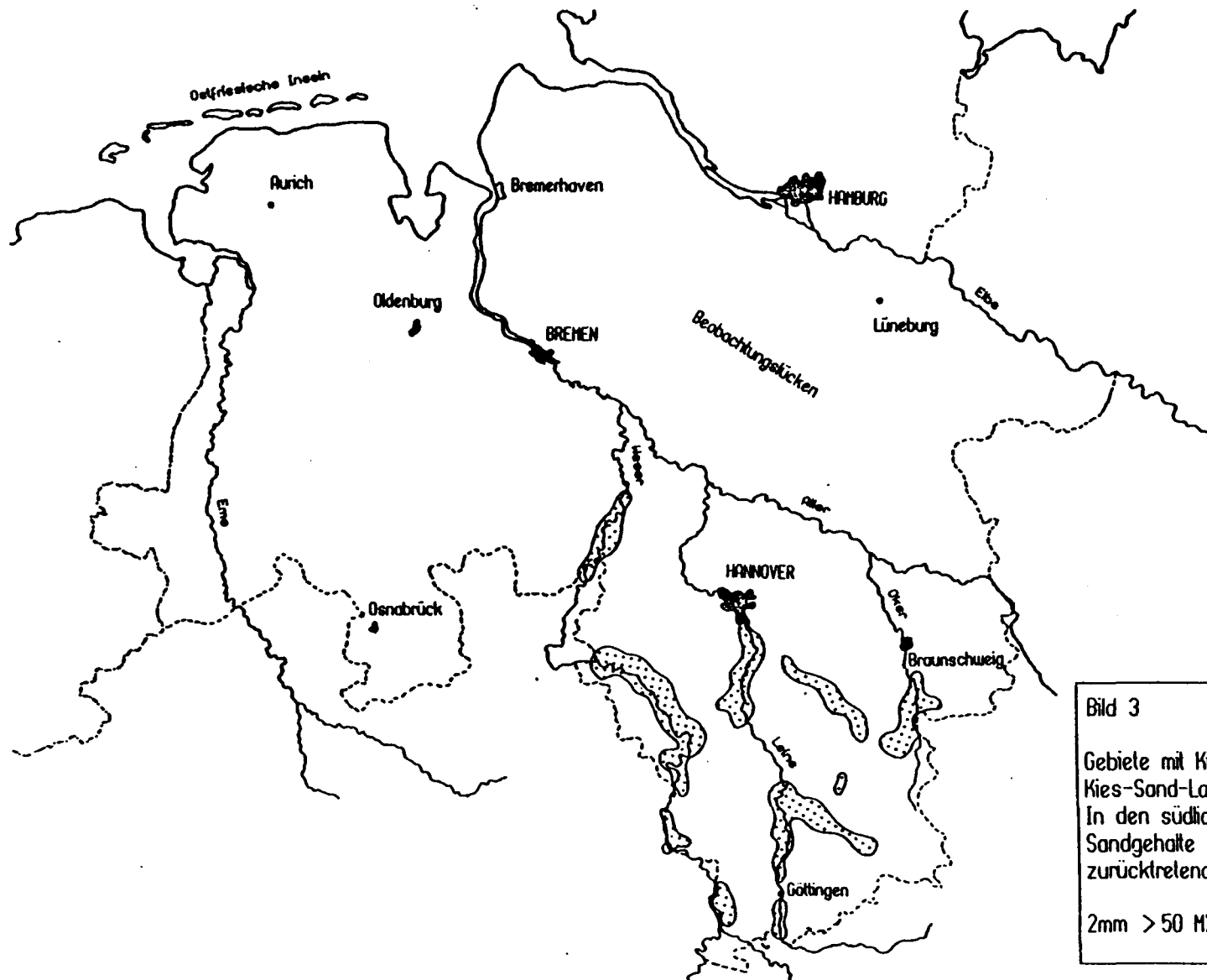


Bild 3

Gebiete mit Kies und
Kies-Sand-Lagerstätten.
In den südlichen Teilen
Sandgehalte stark
zurücktretend.

2mm > 50 M%

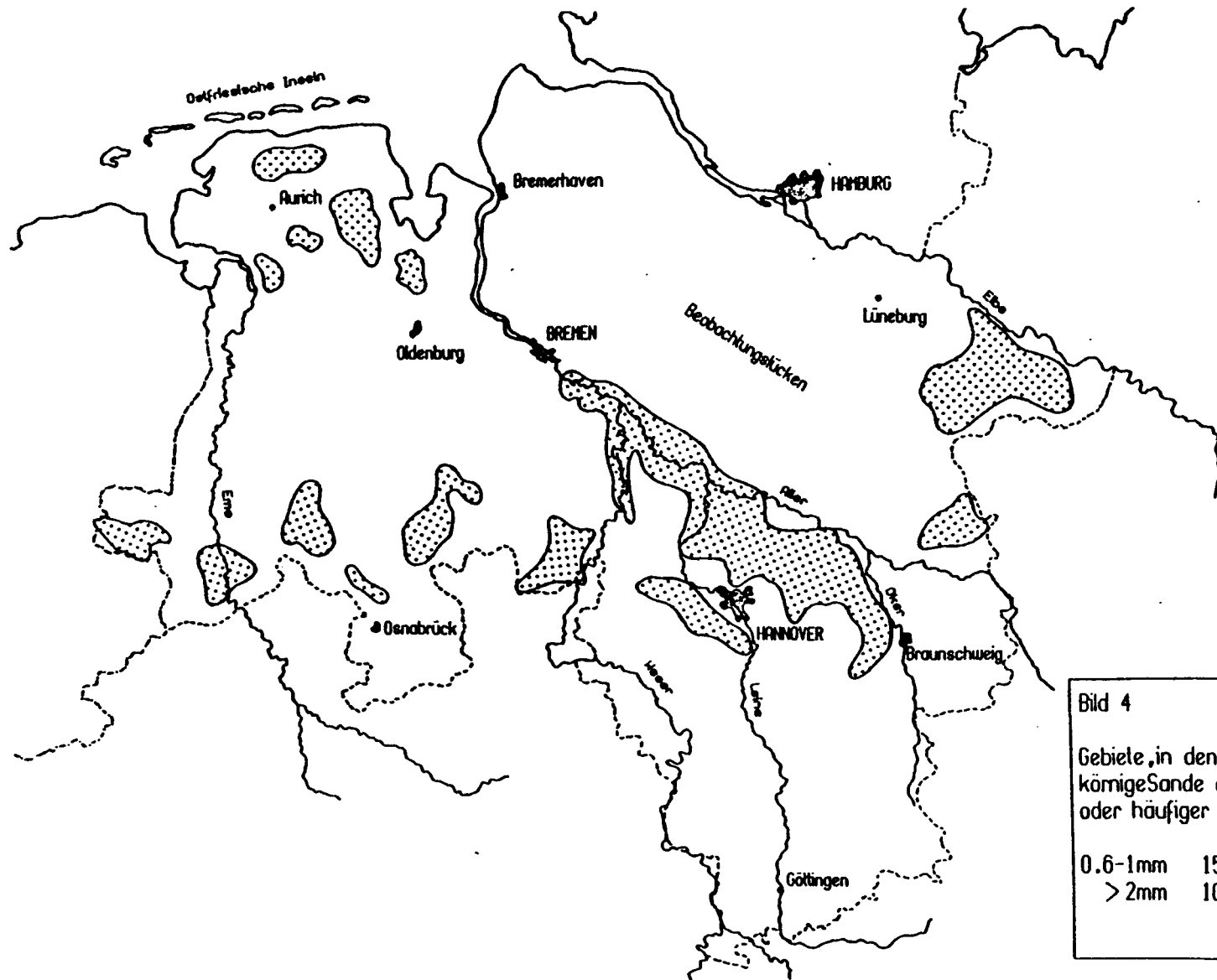


Bild 4

Gebiete, in denen gröberkörnige Sande dominieren oder häufiger auftreten.

0.6-1mm	15-30 MZ
> 2mm	10-25 MZ

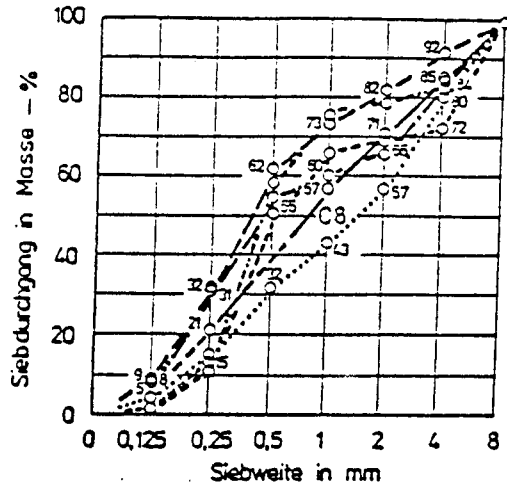


Bild 5: Sieblinien der Vorversuche

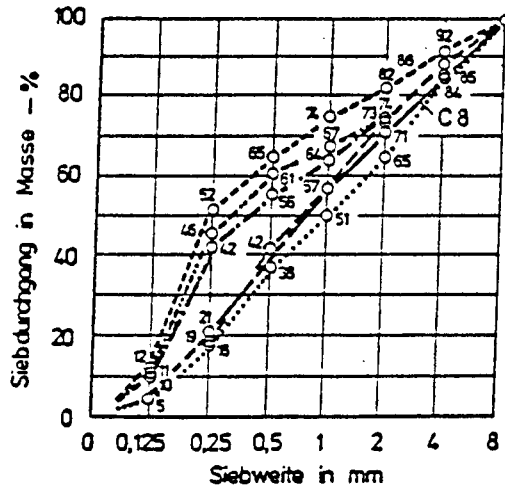


Bild 6: Sieblinien der Hauptversuche

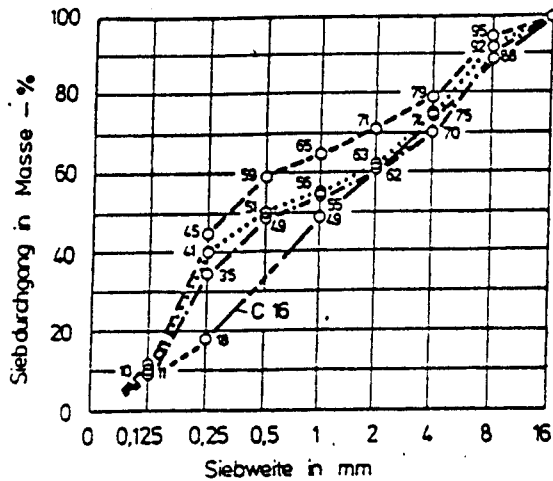


Bild 7: Sieblinien der Hauptversuche
bis 16 mm Korngröße

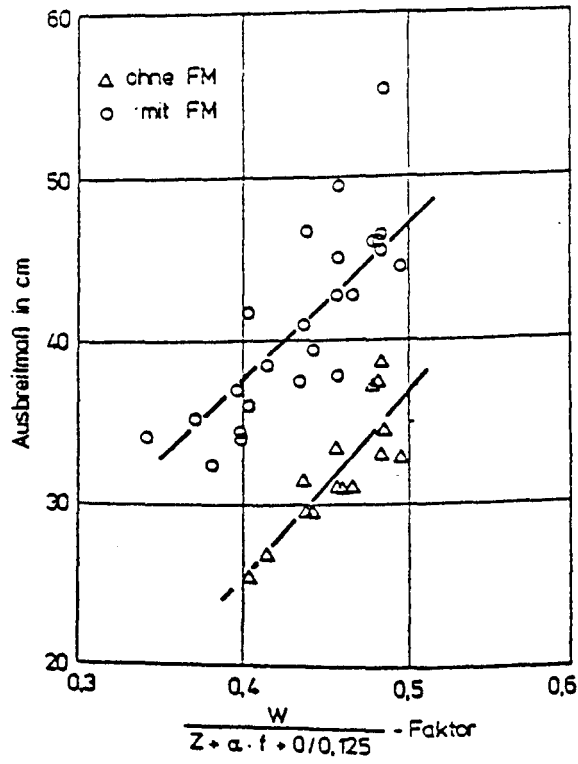


Bild 8 : Sandreicher Beton

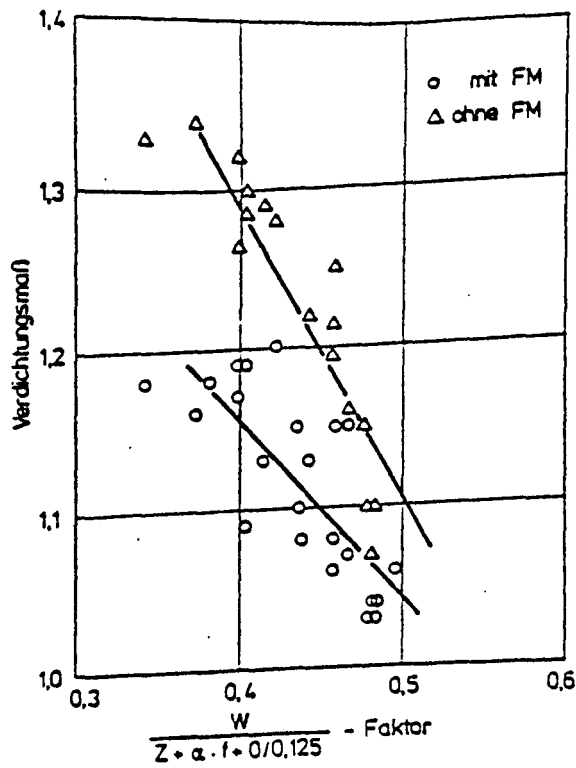


Bild 9 : Sandreicher Beton

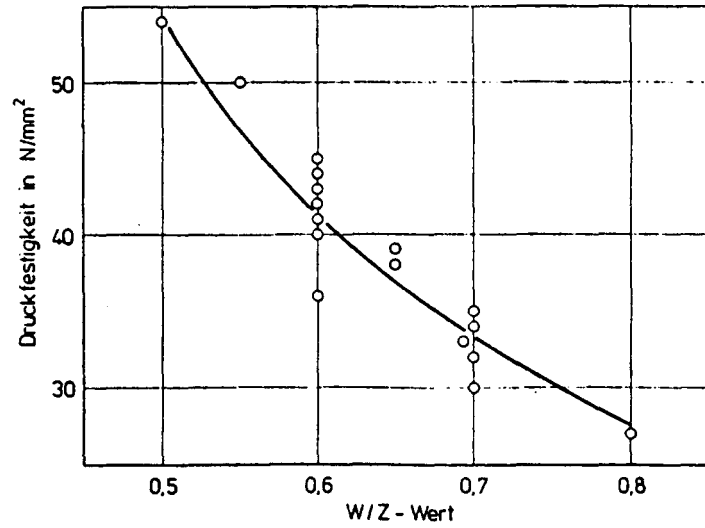


Bild 10 : Sandreicher Beton

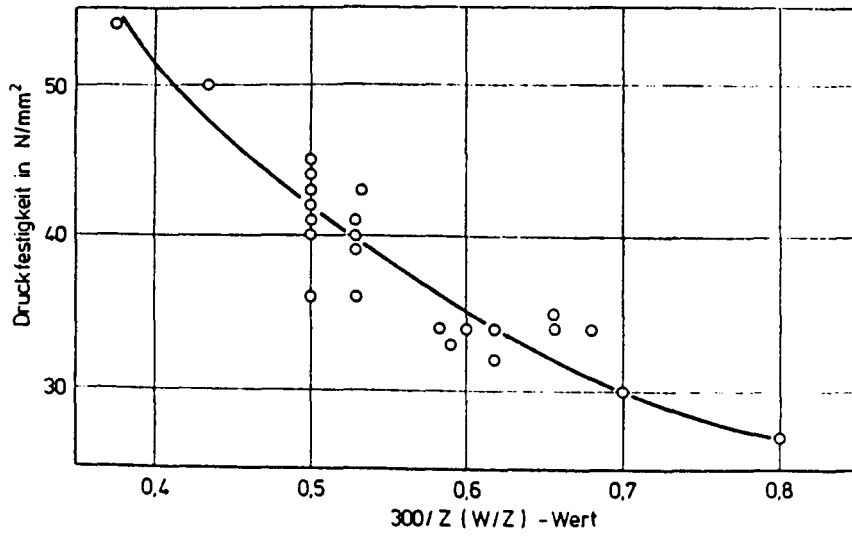


Bild 10a : Sandreicher Beton

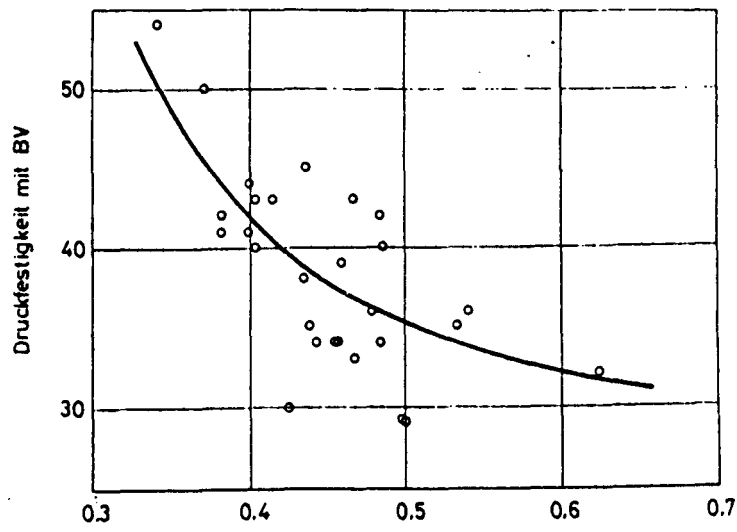


Bild 10 b : Sandreicher Beton

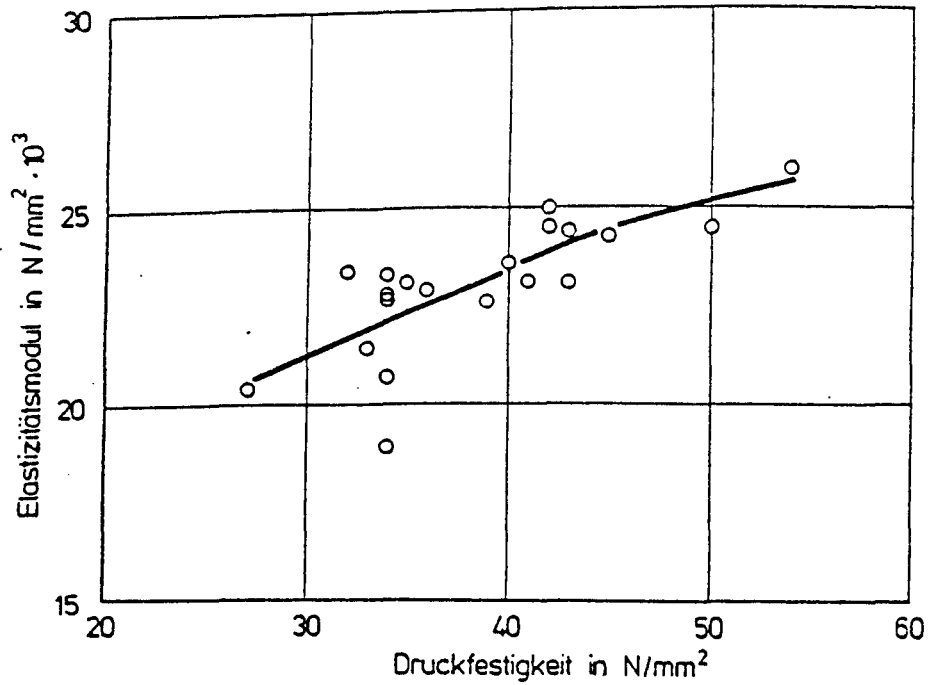


Bild 11 : Sandreicher Beton

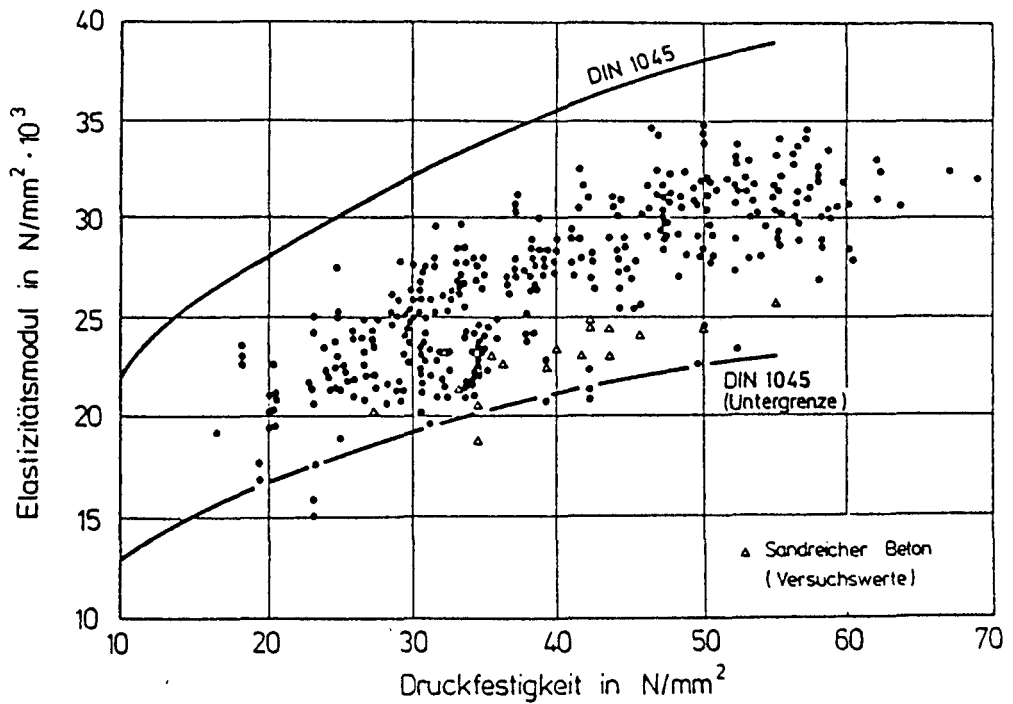


Bild 12 : Sandreicher Beton

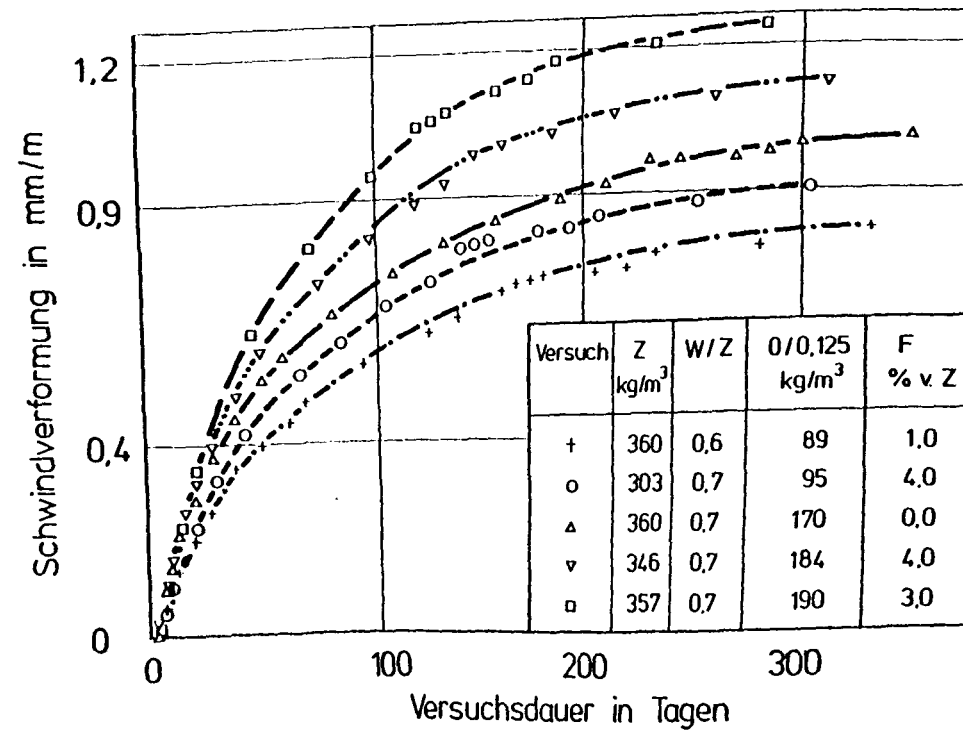


Bild 13 : Sandreicher Beton

Wassereindringtiefe (Mittelwerte) in cm

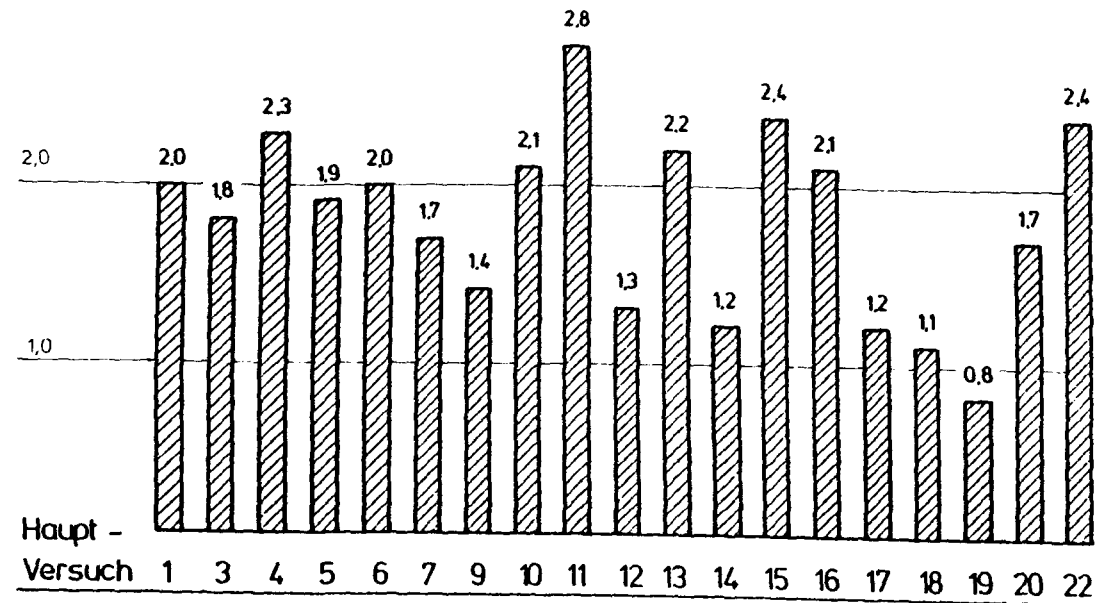


Bild 14 : Sandreicher Beton

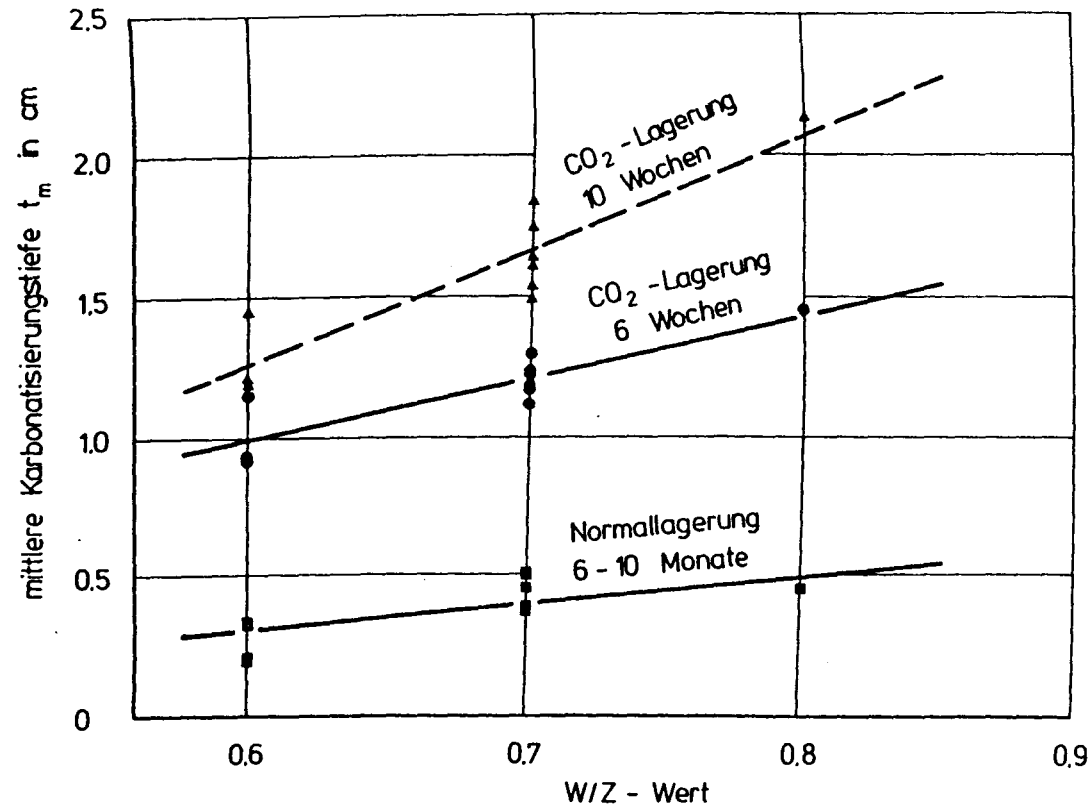


Bild 15 Sandreicher Beton
Karbonatisierungsfortschritt